

# STUDIE DLOUHODOBÝCH ZTRÁT PŘEDPĚTÍ KOMOROVÝCH MOSTŮ V ZÁVISLOSTI NA UMÍSTĚNÍ KOTEV ■ STUDY OF LONG-TERM PRESTRESS LOSSES OF BOX GIRDER BRIDGES IN DEPENDENCE ON LOCATION OF ANCHORS

Lukáš Kadlec, Vladimír Křístek

Nosníky moderních mostů jsou obvykle deskostěnového typu, pro jejichž řešení nemusí být přijatelné použití prutových modelů. Proto je k získání skutečného prostorového chování konstrukce vhodné použít trojrozměrný přístup a aplikovat pokročilé výpočetní metody. Předložená studie je zaměřena na ztráty předpětí vyvolané dotvarováním betonu v souvislosti se ztrátou rovinnosti – deplanací – příčného řezu. Ukazuje se, že deplanace je významná, konkrétně v případech nerovnoměrně rozmístěných a soustředěných předpínacích kabelů v průřezu a v případě kratších rozpětí mostů. Významný je též souběh a vzájemné provázání jednotlivých složek ztrát předpětí v jejich časovém vývoji. ■ The modern bridge girders are of plated character for which the beam type analysis may not be adequate. In order to obtain the real 3D structural performance, it is appropriate to use the three-dimensional approach applying advanced computational analyses. The paper is directed to the cross section warping effect and to the warping induced long term prestress loss due to creep of concrete. It is shown that the severity of cross section warping is significant, particularly in the case of unevenly distributed and isolated tendons in cross-section and in the case of short spans of bridges. Simultaneously, it is necessary take into account mutual interaction of individual components of losses that are coupled together.

Výzkumu skutečného působení mostních komorových nosníků z předpjatého betonu bylo věnováno v průběhu posledních desetiletí značné úsilí. Vznikla řada hypotéz, ověřených i neověřených výsledků a doporučení. U nás se výpočtovou analýzou velkých mostů zabývala řada autorů [12, 13]. Komplexní, velmi důkladná a nákladná analýza působení a konečného kolapsu mostu Koror-Babeldaob Bridge v Palau [3], provedená důsledně s použitím nejnovějších materiálových modelů a finitních metod, s respektováním vývoje statického systému, prostorového působení a se zahrnutím všech detailů uspořádání mostní konstrukce, umožnila pochopení mechanismu skutečného působení komorových mostů. Jedním z nejzávažnějších faktorů je určení skutečných ztrát předpětí.

Je zcela evidentní, že dosažení požadovaného působení prvků a konstrukcí z předpjatého betonu (velikostí a rozložení napětí a deformací, včetně jejich časového vývoje) je podmíněno zajištěním potřebného účinku předpětí – jak velikosti předpínací síly v okamžiku vnesení předpětí, tak i jejího časového vývoje ovlivněného dlouhodobými ztrátami.

Význam této skutečnosti nebyl dosud plně doceňován – měnil-li se napjatost předpjatého konstrukce (závislejší zcela zásadně na předpětí), tak to – pokud nenastanou viditelné poruchy – pozornosti obvykle uniká. Zcela jiná situace je však např. při sledování vývoje průhybů předpjatých mostů velkých rozpětí – ztráty předpětí se zde dramaticky projeví změnou (obvykle nárůstem) deformací, které jsou jasně patrné a měřitelné.

Napětí v konstrukci a deformace (průhyby, natočení) jsou na velikosti ztrát předpětí velmi citlivé, neboť výsledná velikost napětí a deformací je rozdílem velkých čísel (účinku vnějšího zatížení a opačně působícího ekvivalentního zatížení závislého na skutečné velikosti předpětí konstrukce), a proto relativ-

ně velmi malá odchylka od předpokládané hodnoty některého z těchto účinků má velký význam pro výsledek. Obvyklé výpočetní postupy zanedbávající nebo nevystihující věrně všechny účinky mohou vést k zcela chybným závěrům, kdy i jen malá odchylka v jednotlivých dílčích složkách může vést k propastným rozdílům výsledků od skutečnosti.

## ZTRÁTY PŘEDPĚTÍ

V projektové praxi jsou někdy dosud používány výpočtové postupy založené na zjednodušujících předpokladech z minulých století (např. hypotéza o zachování rovinnosti průřezů, ignorování smykových účinků – smykového ochabnutí a smykových deformací stěn průřezů, ignorování vázaného kroucení, používání nerealistických modelů predikce vývoje dotvarování a smršťování betonu apod.).

Např. podle EN 1992-2 [9] je pro návrhové výpočty doporučen zjednodušený postup pro stanovení ztrát předpětí vyvolaných smršťováním, relaxací napětí v oceli a dotvarováním betonu

$$\Delta\sigma_{p,c} = \frac{\varepsilon_{cs} E_p + 0,8\Delta\sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_{cm}} \varphi(t, t_0) \cdot \sigma_{c,QP}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \frac{A_p}{A_c} \left( 1 + \frac{A_c}{I_c} z_{cp}^2 \right) [1 + 0,8\varphi(t, t_0)]} \quad (1)$$

Význam symbolů je popsán v [9].

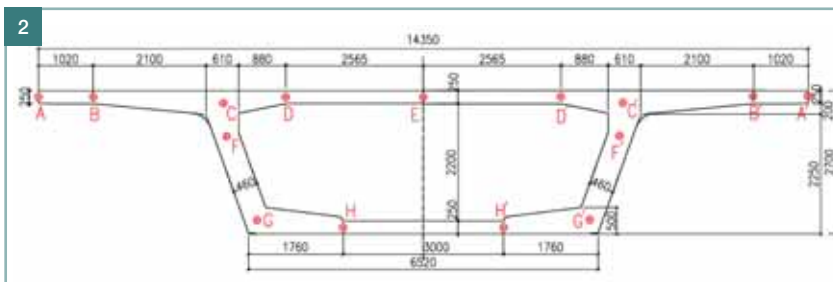
Tento vztah nerespektuje řadu závažných faktorů, např. postupnou výstavbu, změnu okrajových podmínek, postupné předpínání či historii vývoje napětí. Proto uplatnění může nalézt pouze u jednoduchých konstrukčních prvků pozemních staveb. V mostním projektování se s úspěchem uplatňují moderní sofistikované přístupy [14, 15].

## ANALÝZA

Z výsledků experimentálních studií reálných konstrukcí a jejich analýz [2], [3] se objevují další jevy související s prostorovým působením, které se uplatňují ve vývoji ztrát předpětí. Výpočet respektující prostorové působení zahrnuje všechny jemu odpovídající účinky (je možno jmenovat ochabnutí smykem, smykové působení stěn komorových nosníků, vázané kroucení, distortní projevy, napjatost v singulárních oblastech). Přitom průřez obecně přestává být rovinný – obvykle se tento jev obecně označuje jako deplanace. Jednotlivé účinky jsou navzájem propojeny tak, že vyvozují bimoment, např.: soustava kabelů umístěných v průřezu tak, že vyvozují bimoment, vyvolává – kromě ostatních projevů – též vázané kroucení.

Další závažnou, a běžně nerespektovanou, skutečností je, že jednotlivé složky ztrát probíhají v čase současně – v souběhu, takže jejich vývoj je vzájemně propojen, a nelze tedy ve výpočtu časového vývoje vycházet z počátečních hodnot, ale pro další časový interval je nutno použít aktuální silové parametry odpovídající vývoji všech složek ztrát.

V [4] bylo podáno analytické řešení vlivů deplanace průřezu pro jednoduché uspořádání: deskový konstrukční prvek stálé tloušťky s pravidelně rozmístěnými přepínacími jednotkami.



Obr. 1 Řešený mostní segment | Fig. 1 Analysed bridge segment

Obr. 2 Rozměrové relace a rozmístění předpínacích vložek v průřezu

| Fig. 2 Geometry and layout of tendons, cross section

Obr. 3 Deformovaný koncový příčný řez s výraznou deplanací

| Fig. 3 Deformed end cross-section with significant warping effect

V případě komorových mostů je však uspořádání kotev v průřezu nepravidelné a též tloušťky stěn a desek nejsou v rozsahu celého příčného řezu stejné. Předpínací vložky, v závislosti na své poloze, vyvolávají rozdílné účinky; prokazuje se, že významný může být mnohdy ignorovaný vliv deplanace příčného řezu.

Záměrem této studie je sledovat, jak se různě umístěné přímé nesoudržné předpínací vložky podílejí na deplanaci průřezu a následně na ztrátách předpětí v důsledku dotvarování. Záměrem je zejména upozornění na význam prostorového působení, nikoliv návrhový výpočet s konkrétními čísly; při tom jsou však respektovány skutečné tvarové relace, rozměry a materiály mostního průřezu.

Rozmístění kotev bylo voleno tak, aby se pokryly všechny teoretické možnosti umístění kotev (tedy i ty, které jsou z hlediska praxe nereálné). Pro studii byl vybrán segment Sk R1 SB203 (obr. 1) jehož příčný řez ukazuje obr. 2.

Záměrem studie bylo dosažení následujících cílů:

- Analyzovat význam deplanace průřezu ve srovnání s deformací vypočtenou podle elementární teorie ohybu nosníku, v níž se předpokládá zachování rovinnosti průřezů.
- Vytvořit normalizované příčinkové funkce podélných posunů bodů koncového průřezu.
- Zhodnotit poměr skutečných ztrát předpětí (kdy je respektováno tvarové uspořádání průřezu, rozložení kotev, účinky smykových napětí, a další faktory) a ztrát vyčíslených na základě postupů založených na elementárních předpokladech (zejména rovinného rozdělení napětí po průřezu).
- Zhodnotit význam ztrát předpětí vyvolaných dotvarováním betonu v důsledku deplanace průřezu v poměru k ztrátám předpětí stanoveným na základě elementární nosníkové teorie.
- Ocenění významu zahrnutí jevu deplanace průřezů při vyčíslování celkových ztrát předpětí.

Pro řešení uvedených otázek bylo nutno důsledně použít prostorový přístup. Použitý výpočtový model byl deskostěnový (skořepinový), tzn. že napjatost je charakterizována deseti měrnými vnitřními silami a momenty na vyřazeném elementu (dvě normálové síly  $n$ , dvě smykové v tečné rovině  $s$ , dvě smy-

kové kolmo na střednicovou plochu  $q$ , dva ohybové, resp. dva kroutící momenty  $m$ ).

Bezprostřední lokální roznos napětí pod kotvou (jejíž rozměry  $k \times k$  jsou menší než tloušťka prvku) do celé tloušťky prvku však nemůže být tímto modelem postižen. Tento lokální roznos předpínací síly do celé tloušťky betonového prvku  $h$  se děje na délce  $x_{KOT}$ ; na základě analýz provedených MKP byla prokázána použitelnost jednoduchého vzorce  $x_{KOT} = (h - k) / 2$ . Deformaci (lokální zatlačení) kotevních oblastí je potom možno vyjádřit vztahem

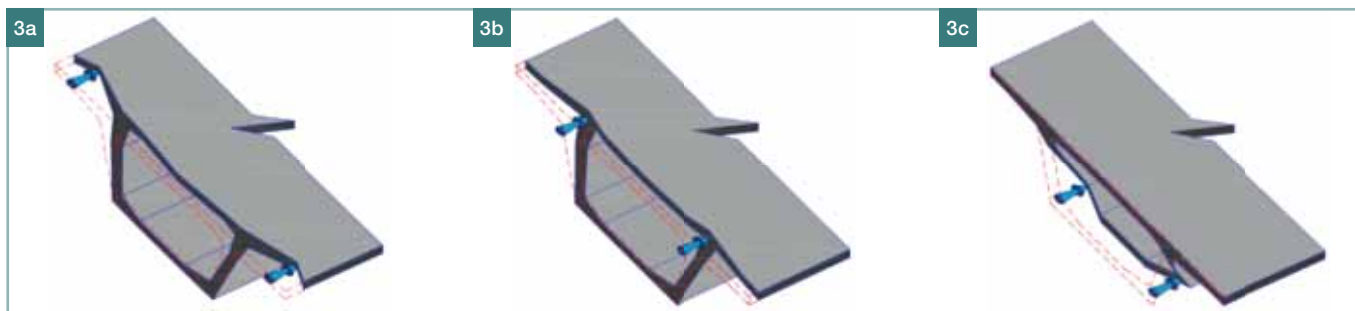
$$\Delta L_{KOT} = \frac{P}{E_{c(t_p)}} \cdot \int_0^{\frac{h-k}{2}} \frac{1}{k^2 + 2(h+k)x} dx = \frac{P}{E_{c(t_p)}(h+k)} \cdot \ln \frac{h}{k}$$

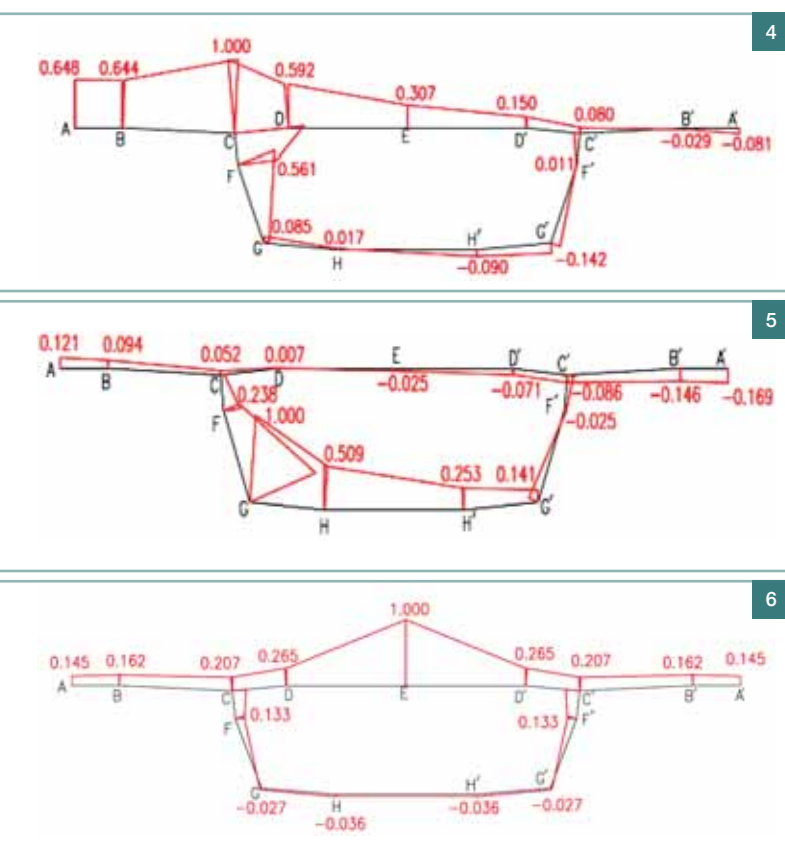
kde  $P$  je velikost síly v ukotvení,  $E_{c(t_p)}$  modul pružnosti betonu ve stáří při ukotvení.

## VÝSLEDKY

### Analýza významu deplanace průřezu ve srovnání s deformací vypočtenou podle elementární teorie ohybu nosníku (s předpokladem zachování rovinnosti průřezů)

Obr. 3 ukazuje deformované příčné řezy na konci nosníku délky 30m v důsledku účinku různě rozmístěných předpínacích sil. Dominantní role deplanace, dramaticky překračující rovinnou složku podélných posunů, je jasně patrná. Působení předpínací síly se projevuje rozdílně v závislosti na různých místech její aplikace. Předpětí působící v konzole (body B, B' viz obr. 2) nebo uprostřed šířky horní desky (bod E) vyvolávají deplanaci s mnohem vyšší intenzitou než předpětí nacházející se v rohových oblastech komory (body C, C' a G, G').





### Vytvoření normalizovaných příčinkových funkcí podélných posunů bodů koncového průřezu

Byl uvažován 30m dlouhý, prostě uložený přímý nosník. Grafy příčinkových funkcí jsou konstruovány pro jednotlivé polohy kabelových kotev v průřezu. Jak plyne z definice příčinkové funkce, je to hodnota sledované veličiny vyvolaná proměnnými polohami zatěžujícího účinku. Výpočet byl proveden za předpokladu, že v betonu nevznikají tak vysoká napětí, která by vyžadovala uvažovat nelineární dotvarování.

Kabely přenášející předpínací sílu jednotkové velikosti jsou postupně umísťovány do různých jednotlivých míst v koncovém průřezu (body B, C, D ..., obr. 2) a pomocí 3D modelu jsou sledovány vyvolané změny délek všech kabelů v časovém vývoji jako parametr rozhodný pro určení ztrát předpětí vyvolaných dotvarováním betonu. Tím se vytvoří příčinkové funkce udávající, jak kabel ukotvený v místě  $j$  přispívá k změně délky kabelu ukotveného v místě  $i$ .

Celkovou krátkodobou délkovou změnu kabelu ukotveného v místě  $i$  potom lze stanovit jako

$$\delta l_i = \sum P_j \left( \zeta_l + \zeta_p \right)_{i,j} \quad \text{pro } j = 1 \text{ až } n, \quad (2)$$

kde  $\zeta$  jsou pořadnice příčinkové funkce pro levý, resp. pravý koncový průřez řešené části mostního nosníku,  $n$  je počet v průřezu ukotvených kabelů a  $P_j$  velikost předpínací síly působící v kabelu ukotveném v místě  $j$ . Příčinkové funkce pro několik umístění kotev jsou uvedeny na obr. 4, 5 a 6.

### Zhodnocení poměru skutečných ztrát předpětí a ztrát vyčíslených na základě postupů založených na elementárních předpokladech

V dalším jsou sledovány součtové účinky symetricky uspořádaných dvojic kabelů, které reprezentují skupiny kabelů, které jsou předpínány současně. Tím se dosáhne reálného stavu, oproti tomu, kdy by se vytvářely závěry z výpočtů působení jednotlivých kabelů, které by vykazovaly ztráty ještě mnohem

větší (jednotlivý kabel, sám o sobě, v obecném umístění v průřezu, vyvolá všechny 3D projevy – kromě svislých a vodorovných ohybů a normálové síly, vznikají smykové projevy a z důvodu účinku zatěžujícího bimomentu vzniká i vázané kroucení).

Proto pro tuto studii je na řešený komorový nosník aplikováno zatížení vždy dvěma kabely, symetricky umístěnými vzhledem k ose symetrie příčného řezu, jak odpovídá praktickému uspořádání, a též proto, aby nevznikaly další zmíněné nepříznivé stavy namáhání (vázané kroucení apod.); jde o dvojice bodů C-C', D-D', F-F', G-G' v obr. 2. Pro úplnost a pro posouzení charakteru jevu zahrnuje studie i z praktického hlediska nereálný případ umístění kabelu do středu šířky horní desky (bod E – obr. 2).

Kabely umístěné v masivních oblastech na rozích průřezu (tj. na bodech CC', DD', FF', GG') v blízkosti styku desek a stěn, vykazují menší nárůst ztrát předpětí vyvolaných deplancí průřezu než kabely nacházející se na konzolách průřezu (body BB') nebo uprostřed šířky desky (bod E – obr. 7). To je plně vysvětlitelné s přihlédnutím k mnohem vyšší tuhosti rohových oblastí ve srovnání s tuhostí širokých a tenkých desek.

### Zhodnocení významu ztrát předpětí vyvolaných dotvarováním betonu v důsledku deplance průřezu v poměru k ztrátám předpětí podle elementární nosníkové teorie

Tento faktor je rozhodujícím způsobem závislý na délce předpjeté části mostního nosníku (tj. na délkách předpínacích kabelů). Obr. 8 znázorňuje, pro několik poloh kabelů, v procentech poměr  $r$  mezi zvýšením ztrát předpětí vyvolaných dotvarováním betonu v důsledku deplance v relaci k ztrátám předpětí stanoveným na základě elementární nosníkové teorie. Tento poměr je funkcí délky předpjeté části mostního nosníku.

Je zřejmé, že délka kabelu zde hraje dominantní roli – uvedený poměr s délkou předpjetého úseku rychle klesá. Křivky mají hyperbolický charakter – tento tvar křivky, vyjadřující poměr  $r$  [%] mezi ztrátami předpětí vyvolanými dotvarováním betonu v důsledku deplance a ztrátami předpětí stanovenými podle elementární nosníkové teorie, pokud označíme délku předpjetého úseku jako  $L$ , může být velmi výstižně aproximován následujícím jednoduchým hyperbolickým vztahem

$$r = C/L^n, \quad (3)$$

což jasně ukazuje na velmi rychlý pokles těchto křivek s nárůstem délky předpjetého úseku  $L$ ; např. pro umístění kabelových kotev F-F' (obr. 8) lze tento vztah aproximovat tvarem

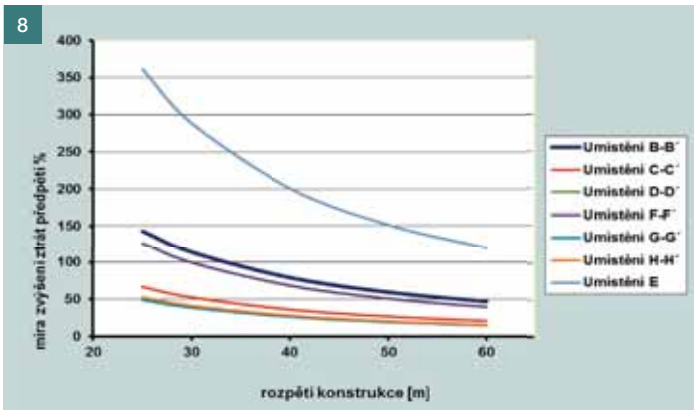
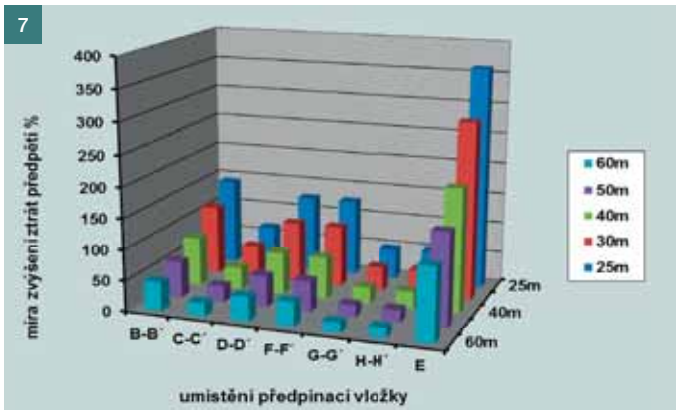
$$r = 8 \cdot 100/L^{1,3} \text{ [%]}. \quad (4)$$

### Ocenění významu zahrnutí jevu nerovinnosti (deplance) průřezů při vyčíslování celkových ztrát předpětí

Jako demonstrační příklad byl řešen 30m dlouhý mostní segment, příčný řez byl opět podle obr. 1, materiál beton C40/50 a předpínací výztuž 1 570/1 770 (napětí po krátkodobých ztrátách – 1 328 MPa). Další zvolené vstupy byly: vlhkost okolního prostředí 80 %, zatížení vneseno v stáří betonu 7 d, předpokládá se normální ošetřování betonu po dobu 5 d.

Pro studii byly uvažovány dvě dvojice přímých, vzhledem k ose průřezu symetricky umístěných (bimomenty nevyvozujičích) nesoudržných kabelů s tím, že budou kotveny v oblastech F-F' a potom v oblastech G-G' (obr. 2). Pro předpokládané zatížení bylo navrženo předpětí a podle různých přístupů vypočteny celkové ztráty předpětí. Pro studii byla složka krátkodobých ztrát vzata nejmenší hodnotou a blíže nezkoumána.





Pro upozornění, jak velmi závažný může být už výchozí krok – volba modelu dotvarování, byly účinky dotvarování betonu vyhodnoceny jak podle Evropské normy (EN), tak i podle modelu B3.

Relaxace napětí v oceli byla počítána podle EN a to pro třídu 1 (lana s normální relaxací) i pro třídu 2 (lana s nízkou relaxací). Smršťování bylo vypočteno podle EN. Všechny složky dlouhodobých ztrát pak byly dány do souladu podle struktury vzorce (1). Podíl jednotlivých složek na celkových ztrátách je rozepsán v tab. 1.

### Výpočet obvyklou metodikou

Výpočet vychází z počáteční hodnoty předpínací síly a vyčíslvány jsou ztráty předpětí vyvolané jednotlivými složkami (krátkodobé ztráty, ztráty relaxací napětí v oceli, smršťování a dotvarování betonu), a následně sečteny. Ztráty vyvolané dotvarováním betonu:

- jsou stanoveny s předpokladem zachování rovinnosti průřezu v souladu s Evropskou normou – vzorec (1),
- jsou stanoveny s respektováním deplanace průřezů (v tab. 1 uvedeny kurzivou).

Zanedbání deplanace se daleko více projeví v místě F-F než v G-G. Pro kabely umístěné v pozicích F-F ztráty předpětí vyvolané dotvarováním betonu s respektováním deplanace průřezu dosahují v řešeném případě 1,82násobku hodnoty ztrát předpětí vyvolaných dotvarováním betonu – pokud by vliv deplanace nebyl respektován. Vliv deplanace se významně projeví i v hodnotách ztrát celkových, zahrnující všechny složky (krátkodobé ztráty a vlivy smršťování a dotvarování betonu) – ignorování vlivu deplanace by v řešeném příkladu znamenalo podcenění celkových ztrát předpětí zhruba o 26 % (výztuž třídy 2) nebo o 16 % (výztuž třídy 1). Pro kabely v místě G-G povede zanedbání vlivu deplanace na podhodnocení celkových ztrát zhruba o 5 %.

### Výpočet respektující skutečný časový vývoj velikosti předpínací síly

Jednotlivé složky dlouhodobých ztrát nejsou vzájemně nezávislé, jak např. mlčky předpokládá Evropská norma – vzorec (1). Významný je souběh a vzájemné provázání jednotlivých složek ztrát předpětí v jejich časovém vývoji. Za účelem ověření výstižnosti uvedeného vztahu byla provedena detailní analýza výpočtu ztrát předpětí metodou časové diskretizace zahrnující vlivy současně se vyvíjejícího smršťování a dotvarování betonu a relaxace napětí v oceli. Pouze takovýto přístup je schopen postihnout ovlivnění vývoje ztrát předpětí těmito současně se vyvíjejícími jevy.

Pro zcela jasný průkaz této skutečnosti bylo nejprve provedeno porovnání pro dlouhodobé ztráty předpětí (bez krátko-

Obr. 4 Normalizovaná příčinková funkce pro podélné posuny bodů koncového průřezu (předpínací vložka v bodě C)

Fig. 4 Normalized influence function of longitudinal displacements of the end section points (prestress applied at the point C)

Obr. 5 Normalizovaná příčinková funkce pro podélné posuny bodů koncového průřezu (předpínací vložka v bodě G)

Fig. 5 Normalized influence function of longitudinal displacements of the end section points (prestress applied at the point G)

Obr. 6 Normalizovaná příčinková funkce pro podélné posuny bodů koncového průřezu (předpínací vložka v bodě E)

Fig. 6 Normalized influence function of longitudinal displacements of the end section points (prestress applied at the point E)

Obr. 7 Míra zvýšení ztrát předpětí vyvolaných dotvarováním v souvislosti s deplanací (vztaženo k předpokladu zachování rovinnosti průřezů)

Obr. 8 Míra zvýšení ztrát předpětí vyvolaných dotvarováním v interakci s deplanací průřezu (vztaženo k hodnotám stanoveným za předpokladu zachování rovinnosti průřezů)

Tab. 1 Podíly jednotlivých složek ztrát předpětí

	Ztráty [MPa]	
	Model dotvarování a smršťování podle B3	Model dotvarování a smršťování podle EN
<b>V místě F</b>		
Krátkodobé ztráty	85,5	85,5
Ztráty relaxací – pro výztuž třídy 1	206,26	208,39
Ztráty relaxací – pro výztuž třídy 2	47,75	48,24
Ztráty smrštěním	49,49	50
Dotvarování betonu	84,89	67,44
Dotvarování s deplanací	154,88	123,05
Ztráty celkem (třída 1, rovinnost)	426,14	411,33
Ztráty celkem (třída 1, s deplanací)	496,73	466,94
Ztráty celkem (třída 2, rovinnost)	267,62	251,18
Ztráty celkem (třída 2, s deplanací)	337,62	306,79
<b>V místě G</b>		
Krátkodobé ztráty	85,5	85,5
Ztráty relaxací – pro výztuž třídy 1	211,65	213,14
Ztráty relaxací – pro výztuž třídy 2	48,99	49,34
Ztráty smrštěním	50,78	51,14
Dotvarování betonu	107,07	84,79
Dotvarování s deplanací	124,8	98,83
Ztráty celkem (třída 1, rovinnost)	455	434,57
Ztráty celkem (třída 1, s deplanací)	472,74	448,62
Ztráty celkem (třída 2, rovinnost)	292,35	270,77
Ztráty celkem (třída 2, s deplanací)	310,08	284,81

dobých) v místě F-F', a to zcela záměrně – pro možnost porovnání s normovou metodikou (vzorec (1)) založenou na předpokladu zachování rovinnosti průřezu: pro případ výztuže třídy 1 a modelu dotvarování B3. Ztráty – při respektování skutečného časového vývoje velikosti předpínací síly – vzrostly z  $206,26 + 49,49 + 84,89 = 340,61$  [MPa] na 384 MPa. Tento výstižnější přístup prokázal nárůst dlouhodobých ztrát předpětí zhruba o dalších 12 %.

Dále byly vyčísleny ztráty předpětí bez zjednodušujícího předpokladu rovinnosti průřezů (tedy se zahrnutím deplanace) a s respektováním skutečného vývoje ztrát předpětí (opět v místě F-F', výztuž třídy 1, model dotvarování B3). Jednotlivé složky ztrát vzrostly z  $206,26 + 49,49 + 154,88 = 410,63$  [MPa] na 418 MPa. V tomto případě to znamená nárůst dlouhodobých ztrát předpětí zhruba o další 2 %. Toto zdánlivě nevýznamné navýšení plyne z toho, že zde je rozhodující složkou vliv dotvarování (154,88 MPa oproti hodnotě 84,89 MPa příslušné rovinným průřezům), které v tomto případě nebylo určeno podle normového vzorce (1), ale mnohem výstižněji.

Porovnáme-li však hodnotu ztrát předpětí určenou obvyklým přístupem (rovinný průřez a ignorování skutečného časového vývoje velikosti předpínací síly (340,61 MPa) a reálný stav respektující jak deplanaci průřezů, tak i skutečný časový vývoj velikosti předpínací síly (418 MPa)), zjišťujeme, že skutečnost převyšuje hodnoty určené obvyklým způsobem zhruba o 23 %, což jistě stojí za pozornost.

## ZÁVĚR

Některé z příčin podhodnocení ztrát předpětí vzniklých v důsledku dotvarování betonu jsou:

- Výpočty nosníkového typu, namísto plnohodnotné 3D analýzy, se základním předpokladem, že průřezy po deformaci konstrukce zůstávají rovinné a kolmé k průhybové čáře, jsou nepřijatelné. Deplanaci průřezů nelze realisticky postihnout klasickou nosníkovou koncepcí. Vzhledem ke konstrukčnímu uspořádání mostních nosníků, musí být použita trojrozměrná analýza.
- Není respektován skutečný časový vývoj velikosti předpínací síly, zahrnující vlivy provázání současně se vyvíjejícího smršťování a dotvarování betonu a relaxace napětí v oceli. Pouze takovýto přístup je schopen postihnout ovlivnění vývoje ztrát předpětí těmito současně se vyvíjejícími jevy.
- Nevýstižné materiálové modely pro predikci dotvarování. Musí být respektován skutečný vývoj dotvarování betonu – z tohoto hlediska je možno doporučit aplikaci modelu B3 [3], který má reálný teoretický základ. V modelu predikce dotvarování vyvolané vysycháním mělo být odděleno od základního dotvarování, protože první závisí na tloušťce prvku a má konečnou hodnotu, zatímco druhé je na tloušťce prvku nezávislé. Model B3 tuto podmínku splňuje [3]. Rovněž by měla být vzata v úvahu reologická nehomogenita průřezů – dotvarování vyvolané vysycháním je významně ovlivněno rozdíly tloušťky mezi horní a dolní deskou průřezu [5]. To vede k nejednotným charakteristikám dotvarování v celém průřezu.

Problematika ztrát předpětí má pro pochopení a návrh předpjatých konstrukcí zásadní význam. Ukazuje se totiž, že závažnost tohoto jevu je tak významná, zejména v případě nerovnoměrně a soustředěně rozdělených předpínacích jednotek po průřezu, že by bylo vhodné zavést do projektové praxe a návrhových doporučení další složku ztrát předpětí: ztráty předpětí vyvolané deplanací průřezu, jejichž velikost narůstá dotvarováním betonu.

Význam respektování 3D přístupu, zahrnující mj. opuštění předpokladu zachování rovinnosti průřezů, se projeví v závislosti na tvarovém uspořádání příčného řezu a na poloze kotev v průřezu.

Uvedené výsledky byly získány v rámci řešení grantového projektu č. 104/11/1301 uděleného Grantovou agenturou České republiky.



Ing. Lukáš Kadlec  
e-mail: kadys@seznam.cz



Prof. Ing. Vladimír Křístek, DrSc., FEng.  
e-mail: vladimirkristek@seznam.cz

oba: Fakulta stavební ČVUT v Praze, Thákurova 7, Praha 6

Text článku byl posouzen odborným lektorem.

## Literatura:

- [1] Bažant Z. P., Baweja S.: Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures: Model B3; *Materials and Structures* 28, 1995
- [2] Bažant Z. P., Li G. H., Yu Q., Klein G., Křístek V.: Explanation of Excessive Long-Time Deflections of Collapsed Record-Span Box Girder Bridge in Palau; *CONCREEP8*, Ise Shima, Japonsko, září – říjen 2008
- [3] Bažant Z. P., Yu Q., Li G.-H.: Excessive Long-Time Deflections of Prestressed Box Girders, I: Record-Span Bridge in Palau and Other Paradigm, *Journal of SE, ASCE / June 2012*
- [4] Vráblík L., Loško J., Křístek V.: K otázce stanovení ztrát předpětí v prvcích a konstrukcích z předpjatého betonu, *Beton TKS 4/2009*, str. 74–79
- [5] Křístek V., Bažant Z. P., Zich M., Kohoutková A.: Box girder deflections: Why is the initial trend deceptive? *ACI Concr. Int.*, 28 (1), 2006, pp. 55–63
- [6] Křístek V., Vráblík L., Bažant Z. P., Li G.-H., Yu Q.: Misprediction of long-time deflections of prestressed box girders: Causes, remedies and tendon lay-out effect. *Proc. 8<sup>th</sup> Int. Conf. Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures (CONCREEP-8)*, 2008, Ise-Shima, Japan, R. Sato, K. Maekawa, T. Tanabe, K. Sakata, H. Nakamura and H. Mhashi, eds., Taylor & Francis, London
- [7] Vráblík L., Loško J., Křístek V.: Prestress loss due to creep and shrinkage in singular regions of concrete members, *fib Symposium Praha 2011*, ISBN 978-80-87158-29-6
- [8] Vráblík L., Křístek V., Teplý B.: Application of B3 prediction model to analyse prestress loss in prestressed concrete members, *IALCCE 2012*, Vienna, Oct. 3–6, 2012
- [9] EN 1992-1-1, Eurocode 2: Design of concrete structures, approved by CEN, 2004
- [10] Křístek V.: Teorie výpočtu komůrkových nosníků, *SNTL Praha*, 1974
- [11] Lehký D., Zidek R., Keršner Z., Vokáč M., Bouška P.: Identifikace materiálových parametrů modelů reologického chování předpjatého pražce, *Beton TKS 2/2013*, str. 57–59, ISSN 1213-3116
- [12] Navrátil J.: Příčiny nadměrných dlouhodobých průhybů mostů velkých rozpětí, *hab. práce, FAST VUT v Brně*, Brno, 1999
- [13] Zich M., Navrátil J.: Vliv diferenčního smršťování a dotvarování na deformace letmo betonovaného mostu přes Vltavu u Vepřeku, *Beton TKS 2/2011*, str. 62–68, ISSN 1213-3116
- [14] Navrátil J.: Použití modulu TDA pro analýzu postupně budovaných mostů, *sb. sem. Statika mostů 2001*, SCIA CZ, 2001
- [15] Křístek V., Navrátil J.: Respektování smykového ochabnutí v technických výpočtech komůrkových nosníků modulem TDA systému NEXIS (Modelling of shear lag in technical calculations using TDA module of EPW system), *Sb. sem. Statika mostů 2002*, mezinár. česko-slovenský odb. sem., Brno, Czech Republic, SCIA CZ & ČKAIT, 2002, pp. 1–7
- [16] Navrátil J.: Modelování předpjatých betonových konstrukcí, *Zb. Betonárske dni 2004*, Bratislava, Slovakia, Stavební fakulta STU, 2004, pp. 303–308, ISBN 80-227-2107-7
- [17] Zich M., Navrátil J.: Vliv smykového ochabnutí na dlouhodobé chování komorových nosníků, *Sb. konf. Betonárske dni 2001*, Pardubice, ČBS ČSSI, 2001, pp. 335–340, ISBN 80-238-7595-7
- [18] Navrátil J., Zich M.: Long-term deflections of long-span bridges, *In Challenges, Opportunities and Solutions in Structural Engineering and Construction*, 2009, The Netherlands, CRP Press, 2009, p. 385–390, ISBN 978-0-415-56809-8